

مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتن سبک T- شکل با استفاده از ورق‌های GFRP

محمد کاظم شربتدار

دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

امیر قدس*

دانشجوی دکترای مهندسی سازه دانشگاه سمنان

چکیده:

به منظور بررسی تأثیر ورق‌های کامپوزیت GFRP در تقویت خمشی تیرهای T- شکل ساخته شده با بتن سبک سازه‌ای، تعداد ۱۰ عدد نمونه تیر آزمایشگاهی طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج آن در این مقاله ارائه می‌گردد. نمونه‌های آزمایشگاهی با توجه به شرایط و میلگردهای به کاررفته در آن‌ها به سه گروه A، B و C متناسب با درصد میلگرد کششی مقطع و تعداد لایه‌های تقویتی تقسیم شدند. طراحی تیرها طوری صورت گرفت که گروه‌های A، B و C به ترتیب دارای ضعف خمشی میانگین، بیشینه و کمینه باشند. در هر گروه، یک تیر شاهد بوده و تیرهای دیگر با تعداد متفاوت لایه‌های FRP تقویت شدند. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته و نتایج حاصله مشاهده شد که ظرفیت خمشی تیرهای گروه A بین ۸۱ تا ۱۱۶ درصد، گروه B بین ۳۳ تا ۲۰۸ درصد، گروه C بین ۶۷ تا ۱۰۰ درصد افزایش یافته و تغییر شکست جداشدگی ورق‌ها از حالت برشی به خمشی و افزایش ظرفیت خمشی و برشی با به کارگیری چسب مخصوص و مواد ضد لغزش در این مقاله بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: GFRP، تیرهای T- شکل، مقاوم‌سازی خمشی، بتن سبک سازه‌ای.

* نویسنده مسؤول: amir.qodes@students.semnan.ac.ir

۱- مقدمه

به دلایل مختلفی چون خرابی‌های ناشی از عوامل محیطی نظیر خوردگی و یا وزش بادهای بسیار شدید، تضعیف اعضاء در اثر اهمال در نگهداری صحیح، خسارات ناشی از زلزله و یا جنگ، تغییر در کاربری، ممکن است سازه‌های بتن آرمه فاقد مقاومت و شکل‌پذیری لازم در مقابل بارهای اعمالی تشخیص داده شوند. تقاضا برای افزایش زیربنا و یا تعداد طبقات موجود و تغییر پارامترهای مورد استفاده در روند طراحی‌ها، به تشدید آن کمک می‌کند. جهت برطرف کردن معایب استفاده از ورقه‌های فولادی در تقویت اعضای بتن مسلح، استفاده از ورق‌های مسلح پلیمری (FRP) که مزایای زیادی در مقایسه با روش استفاده از ورقه‌های فولادی دارند از اواسط دهه ۱۹۸۰ معمول گردید. محققان بسیاری از جمله السلیمانی، چاجس، تالجستن، هاتچینسون، گویش در دانشگاه‌ها و مراکز علمی دنیا در زمینه تقویت خمشی و برشی به وسیله ورق‌های FRP تحقیقات زیادی را انجام دادند [۸ تا ۱]. این ورق‌های پلیمری برخلاف ورقه‌های فولادی تحت اثر عوامل خوردنده واقع نشده و در مقابل اثرات زیان‌بار ناشی از اسیدها، الکل‌ها و نمک‌ها و مواد خوردنده موجود در محیط مقاوم بوده و همچنین حرارت‌های نسبتاً بالا را به خوبی تحمل می‌کنند [۱]. در نتیجه این عوامل مناسب، استفاده از این ورق‌ها نیازمند در نظر گرفتن تمهیدات خاصی قبل از الصاق نبوده و نگهداری آن‌ها نیز بعد از اجرا و نصب در مقایسه با ورق‌های فولادی بسیار راحت‌تر است.

سعادتمنش و احسانی در دانشگاه آریزونای آمریکا مطالعاتی در زمینه تقویت با الیاف مرکب انجام دادند. آن‌ها ۵ تیر مستطیلی و یک تیر T- شکل را تا نقطه گسیختگی تحت بار متمرکز در چهار نقطه با دهانه خالص ۴۵۷۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار دادند. همه تیرها با ورق GFRP به ضخامت ۶ میلی‌متر که با استفاده از چسب مناسب به بتن متصل کردند، مورد تقویت قرار دادند. ۳ نسبت مختلف در میلگردهای داخلی کششی مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها بیانگر افزایش قابل توجهی در بار نهایی به همراه جاری شدن فولاد کششی در تیرها بود. افزایش مقاومت خمشی در تیرهایی که درصد میلگردهای کمتری داشتند، چشمگیرتر بوده است. به علاوه انجام تقویت، میزان ترک‌های

گواتریل و همکارانش، یک سری آزمایش‌هایی روی تیر تقویت‌شده با ورق‌های GFRP انجام دادند. در این تحقیق، تقویت بر روی نمونه‌هایی به طول ۱م انجام گرفت. نتایج به دست آمده بدین صورت بود که با تقویت تیرها ظرفیت نهایی تیر افزایش می‌یابد، ولی شکل‌پذیری تیرها کاهش یافته و خیز نهایی تیر کاهش می‌یابد. ترک‌های خمشی ایجاد شده اغلب به صورت مویی و کوتاه بوده و شکست نهایی به صورت ترد و به صورت جدا شدن ورق در انتهای آن بوده است [۱۱].

در سال ۱۹۹۶ گاردن و همکارانش نشان دادند که ظرفیت نهایی تیرهای تقویت‌شده با ورق‌های CFRP با کاهش نسبت عرض به ضخامت (b/t) و نسبت دهانه برش به عمق (h/d) کاهش می‌یابد. در تقویت با نسبت‌های کوچک‌تر دهانه برش و عمق کرنش‌های قابل توجه در ورقه‌های تقویتی (تا حدود ۷۰٪ کرنش نهایی ورق) و تنش‌های برشی طولی قابل توجهی در فصل مشترک بتن با ورق اتصالی ایجاد شد که گسیختگی تیر به عوامل فوق بستگی دارد. اگرچه بتن گسیخته شده ناحیه بتن پوششی و جداشدگی آن، از بتن تیر در نظر گرفته شده است. مهار انتهای صفحه‌ها، جدا شدن ورق‌های اتصالی را به تأخیر انداخته اما

سختی را تا موقعی که میلگردهای جاری نشده‌اند، افزایش ندادند است [۱۲]

۲-۲ - نمونه‌های آزمایشگاهی

مشخصات هر سه گروه تیر در شکل ۱ نشان داده شده است. تیرهای گروه A مطابق شکل ۱-الف مربوط به تیرهایی است که از لحاظ خمشی دارای ضعف می‌باشند. در این گروه از تیرها از دو میلگرد آجدار نمرة ۱۴ به عنوان میلگرد کششی ($\rho = \frac{A_s}{b_w d} = 0.009$) موجود، دو برابر حداقل میلگرد کششی) و دو میلگرد آجدار نمرة ۱۲ به عنوان میلگرد فشاری استفاده شده است. برای میلگردهای عرضی برشی از میلگرد آجدار نمرة ۸ به صورت خاموت مستطیلی به فاصله محور تا محور ۸۰ میلی‌متر در دو سوم کناری و ۱۰۰ میلی‌متر در یک سوم میانی استفاده شده است. بنابراین تیرها در برش بسیار قوی بوده و ضعفشان در خمش می‌باشد و با تقویت خمشی تیر می‌توان به نتایج مطلوب دست یافت.

تیرهای گروه B مطابق شکل ۱-ب دارای ضعف خمشی بیشتر بوده و از یک میلگرد آجدار نمرة ۱۴ به عنوان میلگرد کششی ($\rho = 0/0045$) موجود، تقریباً برابر حداقل میلگرد کششی) و میلگرد فشاری و میلگرد برشی مشابه تیرهای گروه A بودند. همچنین تیرهای گروه C مطابق شکل ۱-ج دارای ضعف خمشی کمینه می‌باشند. در این گروه از سه میلگرد نمرة ۱۴ آجدار به عنوان میلگرد کششی ($\rho = 0/0135$) موجود، تقریباً سه برابر حداقل میلگرد کششی) استفاده گردید. میلگرد فشاری و میلگرد برشی مشابه تیرهای دو گروه دیگر بودند.

۲-۳ - سیستم بارگذاری و معرفی نمونه‌ها

سیستم بارگذاری از یک قاب فلزی صلب برای نصب جک استفاده شده است. در این تحقیق تیرها به صورت تیر دو سر ساده مورد آزمایش قرار می‌گیرند و بار در یک سوم دهانه متقارن مطابق شکل ۲ اعمال می‌شود که محل نصب کرنش‌سنج و تغییر مکان‌سنج نیز نشان داده شده است.

۲-۴ - نحوه تقویت تیرها

برای تقویت تیرها در سه گروه مختلف از ورق‌های الیاف GFRP به صورت یک، دو یا سه لایه و چسب و رزین‌های مخصوص چسبانده می‌شوند. تیرهای A_۱، A_۲ و A_۳ دارای مقطع

۲- برنامة آزمایشگاهی

در این تحقیق تعداد ۱۰ تیر T- شکل بتن سبک مطابق شکل ۱ با مقطع مشابه به ارتفاع کل ۲۵ سانتی‌متر، عرض بال ۳۰ سانتی‌متر، عرض جان ۱۵ سانتی‌متر، طول کل ۲۰۰ و دهانه تکیه‌گاهی ۱۸۰ سانتی‌متر مورد بارگذاری و آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های آزمایشگاهی در سه گروه مجزای A و C با سه تیر در هر گروه و گروه B شامل ۴ تیر می‌باشند. برای آزمایش‌های هر گروه یک تیر به صورت مرجع تقویت نشده و تیرهای دیگر بسته به نوع ضعف موجود در تیر تقویت گردیدند. لازم به ذکر است این تحقیق در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در سال ۸۸ و بخش تکمیلی آن در سال ۹۰ در دانشگاه سمنان انجام گردید.

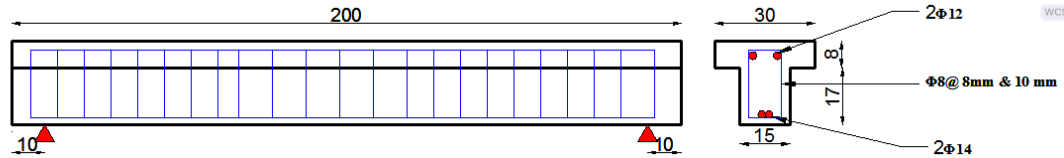
۲-۱ - خواص مصالح مصرفی

مشخصات بتن سبک با ترکیبی از ماسه، لیکا، فوق روان کننده، میکروسیلیس و آب و سیمان مطابق جدول ۱ ساخته شدند و پس از تهیه نمونه‌های فشاری مکعبی، تیرها مطابق جزئیات تهیه شده بتن‌ریزی شدند. نمونه‌های فشاری پس از باز کردن از قالب‌ها، در شرایط مشابه عمل‌آوری شدند و پس از ۲۸ روز و همچنین ۱۰۰ روز، آزمایش گردیدند که در نهایت مقاومت‌های متوسط نمونه‌ها پس از ۲۸ روز و ۱۰۰ روز (هنگام آزمایش تیرها) به ترتیب برابر ۳۴/۱ و ۴۰ مگاپاسکال بودند.

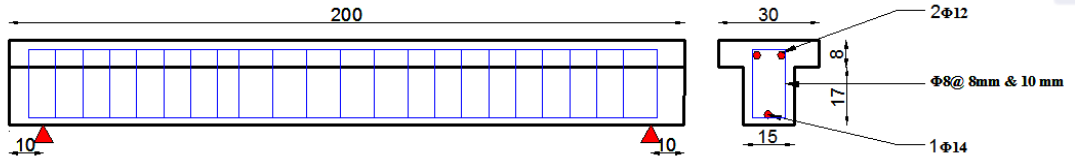
میلگرد داخلی از نوع آجدار تیپ A_۲ بودند که نتایج آزمایش‌های کششی میلگردهای مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. کرنش جاری شدن و کرنش نهایی به ترتیب برابر ۱۷۹۰ و ۲۷۶۴ میکرون بودند. ورق‌های GFRP یک جهته با تنش نهایی ۱۷۰۰ MPa و ضریب ارتجاعی wGPa استفاده شدند. به علت مشکلات جدایش ورق‌های FRP در اکثر گروه‌ها نیاز به اپوکسی قوی‌تر به نظر می‌رسید و در نهایت اپوکسی جدیدتر با مقاومت کششی و برشی بالاتر با نام تجاری Kleeer Koat Table Top (Epoxx-kk512) تهیه گردید تا مود شکست گسیختگی FRP حاصل گردد و از ظرفیت بیشتر تیر و FRP استفاده گردد.

جدول ۱- طرح اختلاط یک متر مکعب بتن سبک

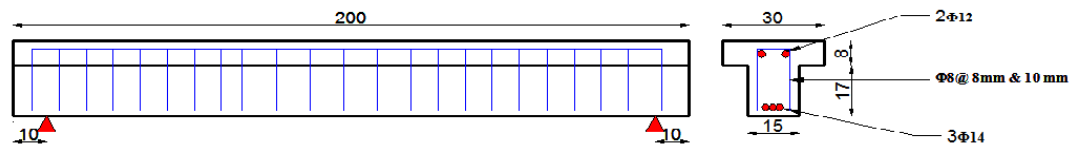
مصلح	سیمان	آب	میکرو سیلیس	ماسه	لیکا	فوق روان کننده	نسبت آب به سیمان	وزن مخصوص
وزن مصلح در یک متر مکعب (kg/m^3)	۴۵۰	۱۸۴/۵	۴۵	۸۳۳/۶۳	۲۷۷/۸۸	۹	۰/۴۱	۱۸۰۰



الف) تیرهای گروه A



ب) تیرهای گروه B



ج: تیرهای گروه C

شکل ۱- مشخصات مربوط به تیرهای آزمایشگاهی

جدول ۲- نتایج آزمایش‌ها کششی میلگردها

ردیف	قطر میلگرد میلیمتر	سطح مقطع cm^2	تنش در جاری شدن kg/cm^2	تنش حد گسیختگی kg/cm^2	درصد ازدیاد طول	مدول الاستیسیته kg/cm^2
۱	۱۰	۰/۷۸۵	۳۵۵۰	۵۶۰۰	۱۵	۲۰۳۹۰۰۰
۲	۱۲	۱/۱۳	۳۸۰۰	۵۶۰۰	۱۵	۲۰۳۹۰۰۰
۳	۱۶	۲/۰۱	۳۸۰۰	۵۶۰۰	۱۵	۲۰۳۹۰۰۰

تیرهای قبلی بررسی گردید. ماده ضد لغزش انتی اسلیپت ساخت کارخانه اسلیپ رسیستور آمریکا می باشد.

۳- مشاهدات و نتایج اولیه آزمایش ها

نحوه شکست و توزیع ترک ها در سه دسته نمونه A و B و C در اشکال ۷ تا ۹ نشان داده شده اند. شکست تیرهای مرجع همگی از نوع خمشی به همراه جاری شدن میلگردهای کششی می باشد. در کلیه تیرهای تقویت شده به غیر از تیر C₂ که همراه با گسیختگی FRP بوده در بقیه تقویت ها به صورت برشی با جدا شدن ورق تقویتی از بتن و یا به همراه لایه ای از بتن بوده است. نحوه توزیع ترک ها نیز با ترک خمشی از وسط تیر شروع شده و با امتداد یافتن به سمت بال و ترک های برشی از سمت تکیه گاه به سمت نقطه بارگذاری در اکثر گروه ها گسترش می یابد.

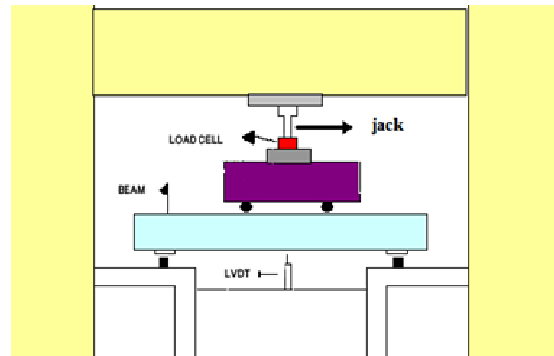
۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- مقایسه تیرهای گروه های A, B, C

نمودارهای بار - تغییر مکان وسط تیرهای در سه گروه در اشکال ۱۲ (الف) تا (ج) نشان داده شده است. ضمناً جداول (۳)، (۴) و (۵) میزان بار ترک خوردگی و درصد افزایش آن در قیاس با تیر کنترل و همچنین بار نهایی قابل حمل توسط تیرها در اثر تقویت های انجام شده و خیز حداکثر در دهانه میانی تیرها به هنگام گسیختگی را در سه گروه مختلف ارائه می کند. جدول ۶ هم پیشینه بارهای آزمایشگاهی و آیین نامه ای مطابق آئین نامه ACI 440R و بار تحلیلی از روش تحلیلی مرجع [۲] مقایسه گردیده است که در روش تحلیلی انطباق خوبی وجود دارد و در روش آیین نامه برای درصد فولاد متوسط و زیاد انطباق خوب می باشد. برای پیدا کردن بار نهایی در آیین نامه ACI 440R از رابطه شماره (۱) ارائه شده در آیین نامه استفاده گردید که در آن ضریب ϕ_f برابر 0.85 قرار داده شد و ضریب β_1 نیز از بند ۱۰.۲.۷.۳ آیین نامه ACI-318-05 به دست می آید و بقیه ضرایب مورد نیاز در رابطه زیر جهت محاسبه f_{fe} و Φ نیز مطابق آیین نامه ACI-440R محاسبه گردید.

(۱)

$$M_u = \phi \left\{ A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \phi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A'_s f'_s \left(\frac{\beta_1 c}{2} - d \right) \right\}$$



شکل ۲- چیدمان آزمایش و نصب ابزار اندازه گیری

عرضی یکسان بوده به طوری که تیر A₁ به عنوان تیر مرجع بوده و دو تیر A₂ و A₃ با یک و دو لایه ورق GFRP یک جهت به تنش تسلیم ۱۷۰۰MPa و مدول الاستیسیته ۷۰۰۰MPa مطابق شکل ۳ تقویت شدند. عرض ورق تقویتی ۱۶cm و طول آن ۱۶۰cm و ضخامت این ورق ۰/۳ میلی متر می باشد.

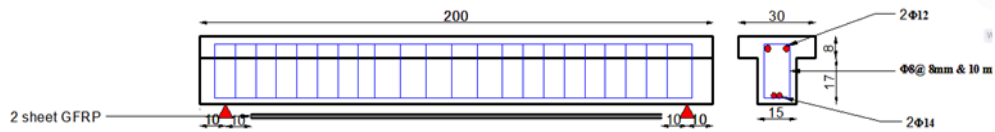
تیرهای گروه B شامل چهار تیر B₁، B₂، B₃، B₄ بوده که تیر B₁ به عنوان تیر مرجع بوده و تیرهای B₂، B₃ و B₄ مطابق شکل ۴ به ترتیب با یک لایه، دو، و سه لایه تقویت شدند. تیرهای گروه C شامل تیر C₁ و C₂، C₃ با مشخصات یکسان بوده که تیر C₁ به عنوان تیر مرجع و تیرهای C₂ و C₃ مطابق شکل ۵ با یک لایه و دو لایه تقویت شدند. یک نمونه از نحوه تقویت تیرها با GFRP در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲-۵- استفاده از اپوکسی قوی تر و ماده ضد لغزش

با توجه به شکست برشی احتمالی در اکثر گروه ها ناشی از جداشدگی ورق FRP در هر گروه، تقویت تیرها یک بار با اپوکسی قوی تر و دگر بار همزمان از ماده ضد لغزش انتی اسلیپت و اپوکسی پرمقاومت استفاده گردید. با انجام این عمل تأثیر اپوکسی قوی تر در جهت استفاده از ظرفیت حداکثری و همچنین تأثیر ماده ضد لغزش در افزایش بیشتر این ظرفیت و جلوگیری از لغزش و جداشدگی FRP مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش ۶ تیر با مشخصات رفتاری و مکانیکی مشابه قوی ترین تیر تقویت شده در هر گروه تهیه گردید و رفتار تغییر مکان وسط آن ها در مقایسه با قوی ترین تقویت گروه ها در

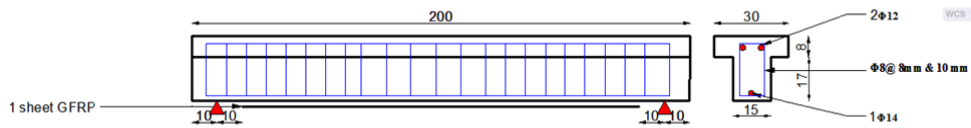


الف - تقویت تیر A_1

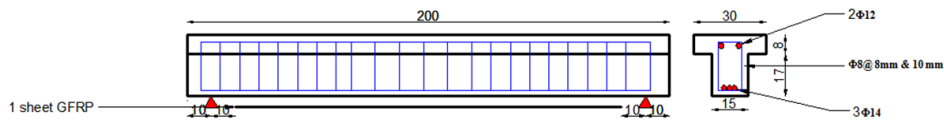


ب - تقویت تیر A_3

شکل ۳- نحوه تقویت تیرهای گروه A



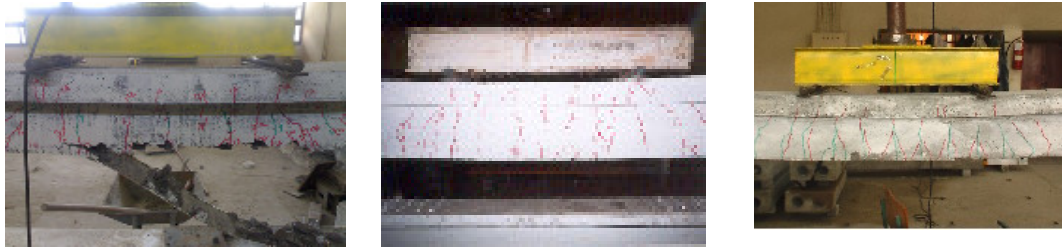
شکل ۴- نحوه تقویت تیر B_2



شکل ۵- نحوه تقویت تیر C_2



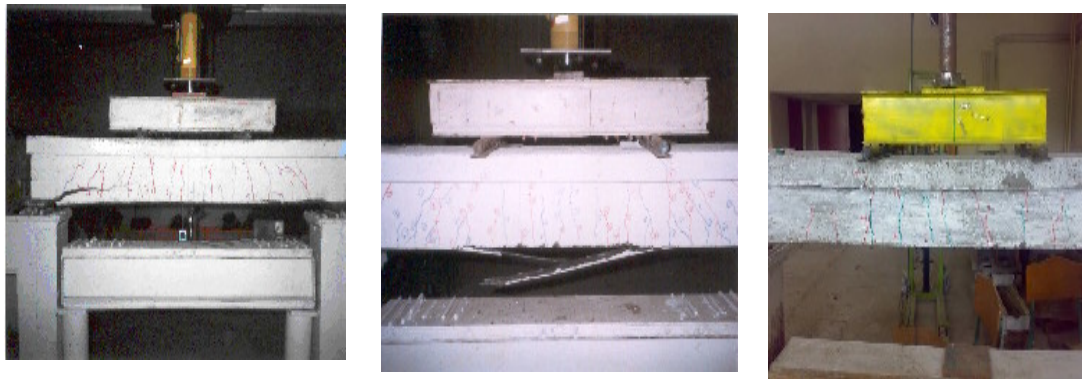
شکل ۶- نحوه تقویت یکی از تیرها با ورق GFRP



الف- نحوه شکست تیر A_1 ب- نحوه شکست تیر A_2 ج- نحوه شکست تیر A_3
شکل ۷- توزیع ترک‌های تیرهای گروه A



الف- نحوه شکست تیر B_1 ب- نحوه شکست تیر B_2 ج- نحوه شکست تیر B_3
شکل ۸- توزیع ترک‌های تیرهای گروه B



الف- نحوه شکست تیر C_1 ب- نحوه شکست تیر C_2 ج- نحوه شکست تیر C_3
شکل ۹- توزیع ترک‌های تیرهای گروه C

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های گروه A

نوع گسیختگی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	بار ترک خوردگی برشی تن	بار ترک خوردگی خمشی تن	خیز حداکثر میلی‌متر	افزایش بار نهایی نسبت به تیر شاهد	بار نهایی تن	مقاومت فشاری بتن Kg/cm^2	نمونه
خمشی همراه با جاری شدن میلگردهای کششی	-	-	۵/۹۶	۳	۲۸/۶۷	-	۸	۴۱۷	A ₁
جدا شدن CFRP همراه با جدا شدن لایه‌ای از بتن	۰٪/۶۷	٪۴۸	۶	۴/۵۳	۲۰/۲	٪۸۱	۱۴/۵	۴۱۶	A ₂
جدا شدن CFRP همراه با ترک و گسیختگی لایه‌ای از بتن	۰	٪۵۹	۵/۹۶	۴/۶	۲۲/۴	٪۱۱۶	۱۷/۳	۴۲۵	A ₃

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های گروه B

نوع گسیختگی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	بار ترک خوردگی برشی تن	بار ترک خوردگی خمشی تن	خیز حداکثر میلی‌متر	افزایش بار نهایی نسبت به تیر شاهد	بار نهایی تن	مقاومت فشاری بتن Kg/cm^2	نمونه
خمشی همراه با جاری شدن میلگردهای کششی	-	-	۵/۵	۳	۹/۳۷	-	۶	۴۳۶	B ₁
جدا شدن CFRP با جدا شدن لایه بتن	٪۳/۶	٪۶۶	۵/۷	۵	۱۲/۲۷	٪۳۳	۸	۴۲۶	B ₂
جدا شدن CFRP با جدا شدن لایه بتن	٪۷/۲	٪۱۳۳	۵/۹	۷	۸	٪۱۰۰	۱۲	۴۲۶	B ₃
جدا شدن CFRP با جدا شدن لایه بتن	٪۱۳	٪۱۶۶	۶/۲	۸	۱۰/۹۸	٪۲۰۸	۱۸/۵	۴۲۶	B ₄

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های گروه C

نوع گسیختگی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	بار ترک خوردگی برشی (تن)	بار ترک خوردگی خمشی (تن)	خیز حداکثر میلی‌متر	افزایش بار نهایی نسبت به تیر شاهد	بار نهایی (تن)	مقاومت فشاری بتن Kg/cm^2	نمونه
خمشی همراه با جاری شدن میلگردهای کششی	-	-	۶	۳/۲	۱۹	-	۱۰/۵	۴۲۷	C ₁
گسیختگی FRP برشی	٪۲۵	٪۷۲	۷/۵	۵/۵	۱۴/۵۶	٪۶۷	۱۷/۵	۴۱۹	C ₂
گسیختگی FRP برشی	٪۱۸	٪۱۰۹	۷/۱	۶/۷	۱۹/۲۶	٪۱۰۰	۲۱	۴۰۶	C ₃

جدول ۶- مقایسه بارهای ماکزیمم آزمایشگاهی و تجربی

بار آیین نامه ACI440R	بار ماکزیمم آزمایشگاهی (تن)	بار ماکزیمم تجربی (تن)	تیر
۵/۹۸	۸	۷/۲۹	A ₁
۱۱/۸۳	۱۴/۳	۱۴/۴	A ₂
۱۷/۱۴	۱۷/۵	۱۹/۹	A ₃
۵/۵	۶	۵/۵	B ₁
۹/۱۵	۸	۷	B ₂
۱۴/۷	۱۲	۱۱	B ₃
۱۹/۷	۱۸/۵	۱۸/۵	B ₄
۸/۸	۱۰/۵	۱۰/۶	C ₁
۱۴/۴۱	۱۷/۵	۱۷	C ₂
۱۹/۴۷	۲۱	۲۰	C ₃

با مقایسه نمودارهای تیرهای B₁، B₂، B₃، B₄ در شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ (ب) مشاهده می‌شود که اولین ترک خمشی در تیرهای B₂ و B₃ و B₄ به ترتیب ۶۶٪، ۱۰۰٪ و ۱۶۶٪ افزایش یافته‌اند. اولین ترک برشی در تیرهای B₂، B₃ و B₄ مقدار کمی افزایش یافته است. افزایش مقاومت تیر B₂ نسبت به B₁ تقریباً ۳۳٪ و افزایش مقاومت تیر B₃ نسبت به B₁ تقریباً ۱۰۰٪ بوده است. این افزایش مقاومت برای تیر B₄ نسبت به B₁ تقریباً ۲۰۸٪ بوده است. با توجه به نوع شکست جداسازی تیرهای B₂ و B₃ و B₄ به این نتیجه می‌توان دست یافت که تقویت مناسب انجام شده است ولی هنوز تیرها جا برای مقاومت بیشتر را دارند زیرا که ورق‌های GFRP گسیخته نشده‌اند بلکه به همراه لایه‌ای از بتن از تیر جدا شدند و این نشان می‌دهد که ورق‌های GFRP هنوز قابلیت تحمل بار بیشتر را دارند.

همچنین با مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان تیرهای C₁ و C₂، C₃ در شکل ۱۲ (ج) مشاهده می‌شود که اولین ترک خمشی در تیرهای C₂ و C₃ به ترتیب ۷۲٪ و ۱۰۹٪ افزایش داشته‌اند. اولین ترک برشی ایجاد شده در تیرهای C₂ و C₃ به ترتیب ۲۵٪ و ۱۸٪ افزایش داشته‌اند که این افزایش می‌تواند از جهت استفاده دو نوار U شکل در نزدیکی دو تکیه‌گاه باشد. شکست تیر C₂ و C₃ به ترتیب از نوع گسیختگی FRP و برشی می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه شد در این تقویت افزایش مقاومت خوبی را شاهد بوده که این افزایش ۶۷ درصد برای تیر C₂ و ۱۰۰٪ برابر تیر C₃ می‌باشد.

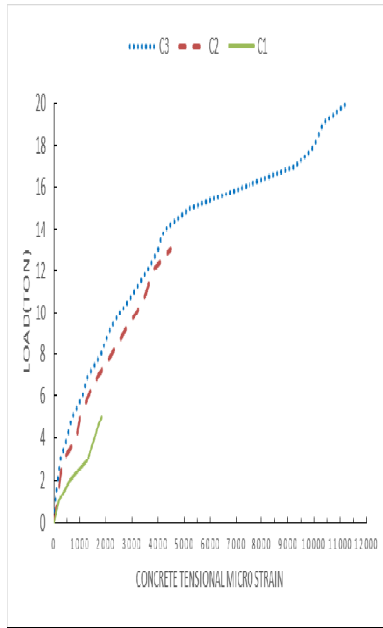
با استفاده از اپوکسی قوی تر شاهد افزایش ۵/۷٪ و ۱۹/۵٪ و ۱۰٪ افزایش بار نهایی به ترتیب در گروه‌های A، B و C نسبت به قوی‌ترین تقویت گروه‌ها با اپوکسی معمولی می‌باشیم. استفاده همزمان از اپوکسی قوی و ماده ضد لغزش (Anti-slipt) این درصدها را به ۱۲/۵٪، ۳۶٪ و ۲۰٪ افزایش داد که نشانگر کاربرد مفید این ماده در جهت جلوگیری از لغزش FRP و استفاده بیشتر و بهتر از ظرفیت خمشی بتن و FRP می‌باشد.

۴-۲- کرنش در ورق‌های تقویتی

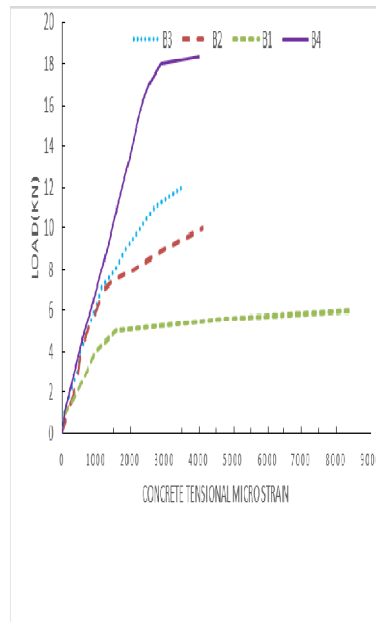
مشاهده اشکال ۱۰ و ۱۱ مربوط به نمودار بار - کرنش فشاری و بار - کرنش کششی تیرها می‌باشد که با انجام عمل تقویت شاهد

شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ (الف) در خصوص تیرهای گروه A نشان می‌دهد که اولین ترک خمشی ایجاد شده در باری تقریباً ۱/۵ برابر برای A₂ و A₃ به وجود آمده است. اولین ترک‌های برشی تقریباً برابر بود و انتظار هم می‌رفت که تیرها در یک بار مشخص به اولین ترک برشی برسند. همان‌طور که مشاهده شد افزایش مقاومت ایجاد شده در تیر A₂ حدود ۸۱٪ و در تیر A₃ حدود ۱۱۶٪ بوده که این مقدار قابل توجه می‌باشد. ولی باید این نکته را در نظر گرفت که مقدار واقعی افزایش ظرفیت باربری می‌توانست به مراتب بیشتر از این مقدار باشد زیرا اولاً شکست تیرهای A₂ و A₃ از نوع جداسازی FRP بوده و تیر و FRP قبل از اینکه از تمام ظرفیت خمشی خود استفاده کنند جداسازی FRP رخ داده است. همچنین اگر بار وارده برای اولین ترک در تیرها مقایسه شوند مشاهده خواهد شد که بار اولین ترک در تیرهای A₂ و A₃ هر دو تقریباً ۱/۵ برابر تیر A₁ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش ظرفیت خمشی تیر A₃ می‌توانست به مراتب بیشتر از آنچه مشاهده شده است باشد.

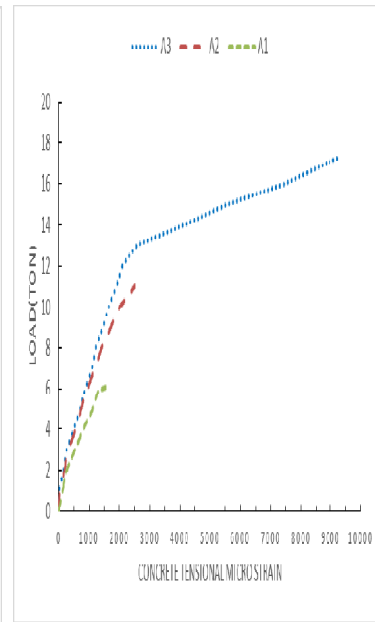
مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتن سبک T- شکل با ...



ج- گروه C

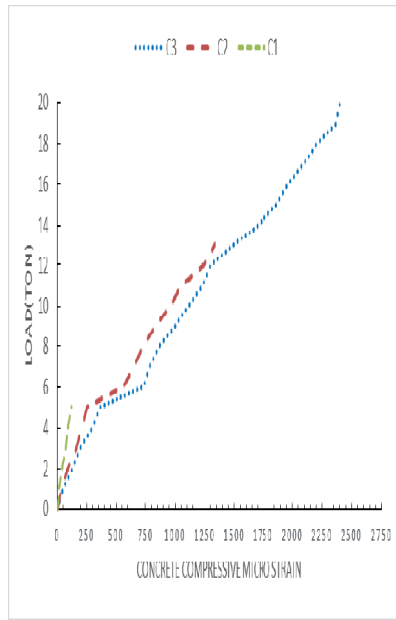


ب- گروه B

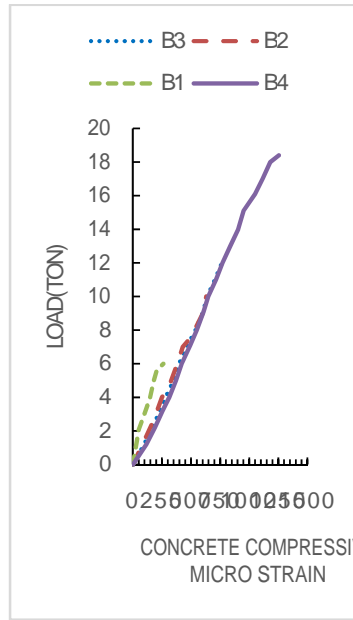


الف- گروه A

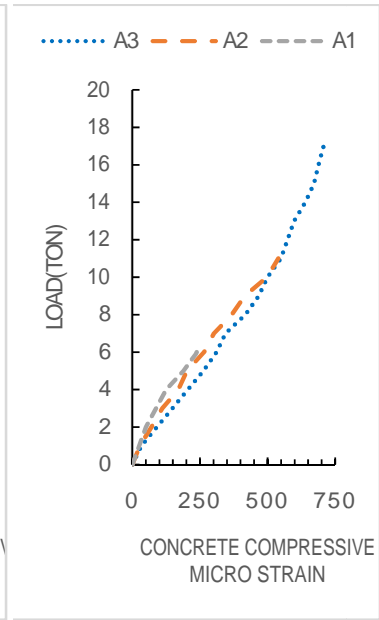
شکل ۱۰- نمودار بار- کرنش کششی تیرهای گروه A، B، C



ج- گروه C

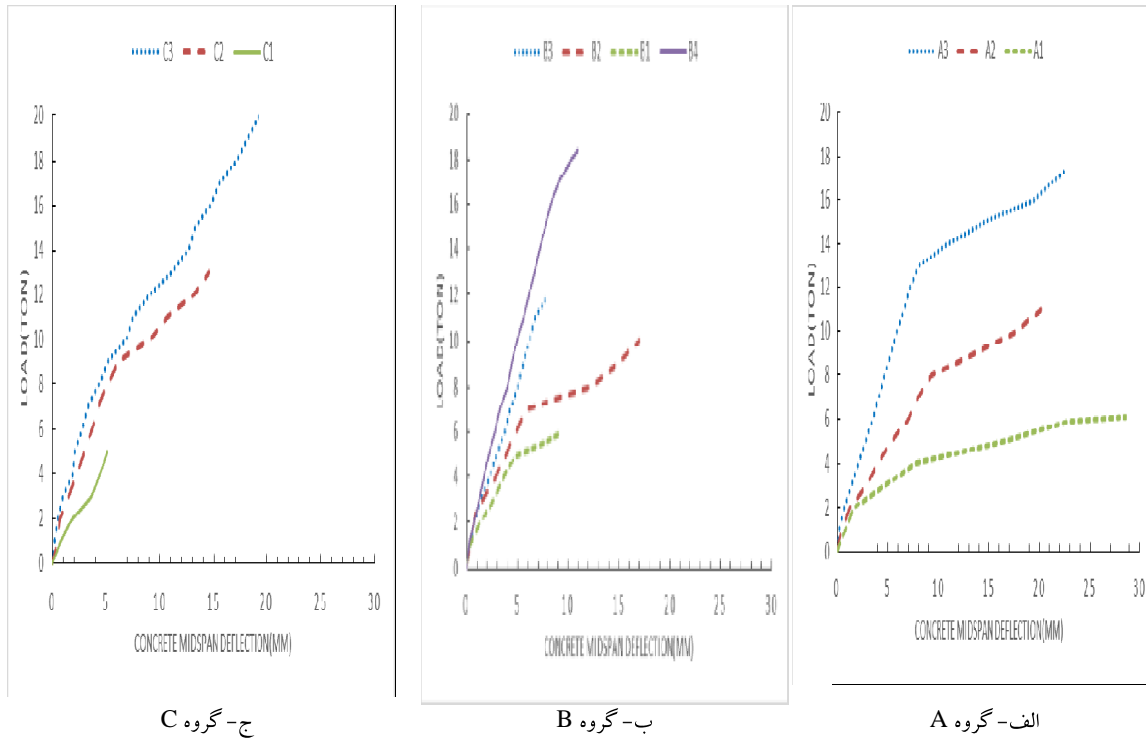


ب- گروه B

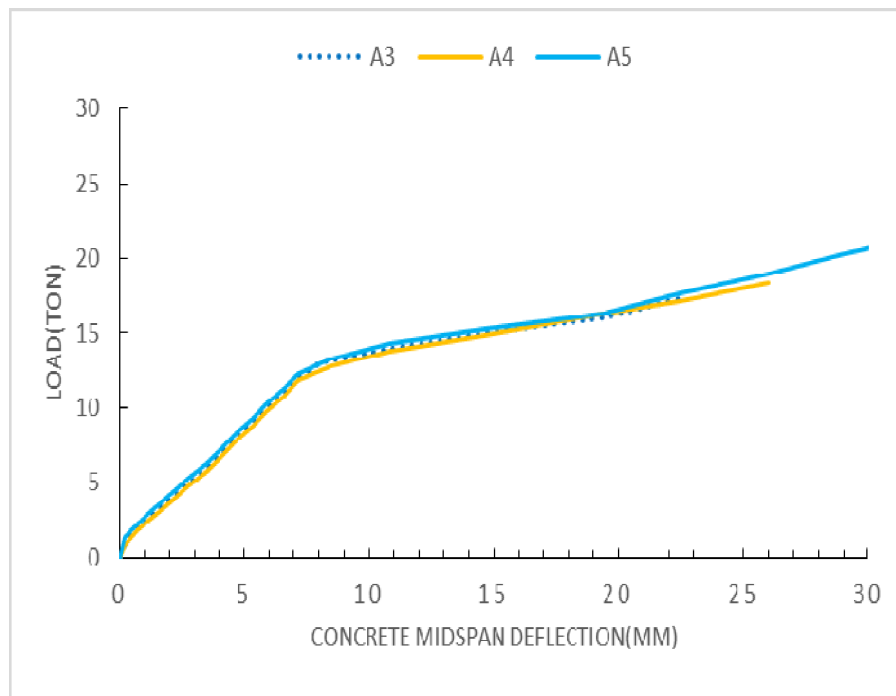


الف- گروه A

شکل ۱۱- نمودار بار- کرنش فشاری تیرهای گروه A، B، C

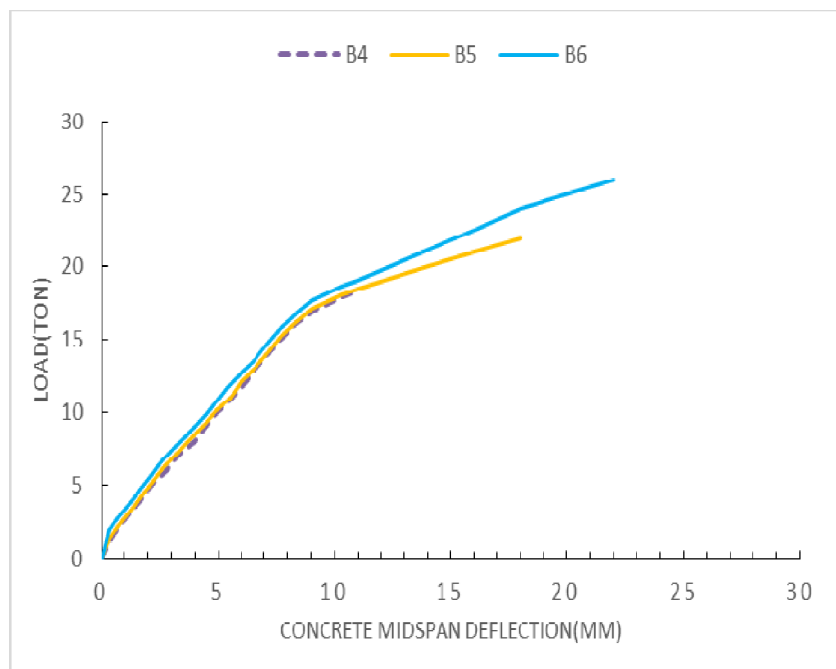


شکل ۱۲- نمودار بار-تغییر مکان وسط تیرهای گروه A, B, C

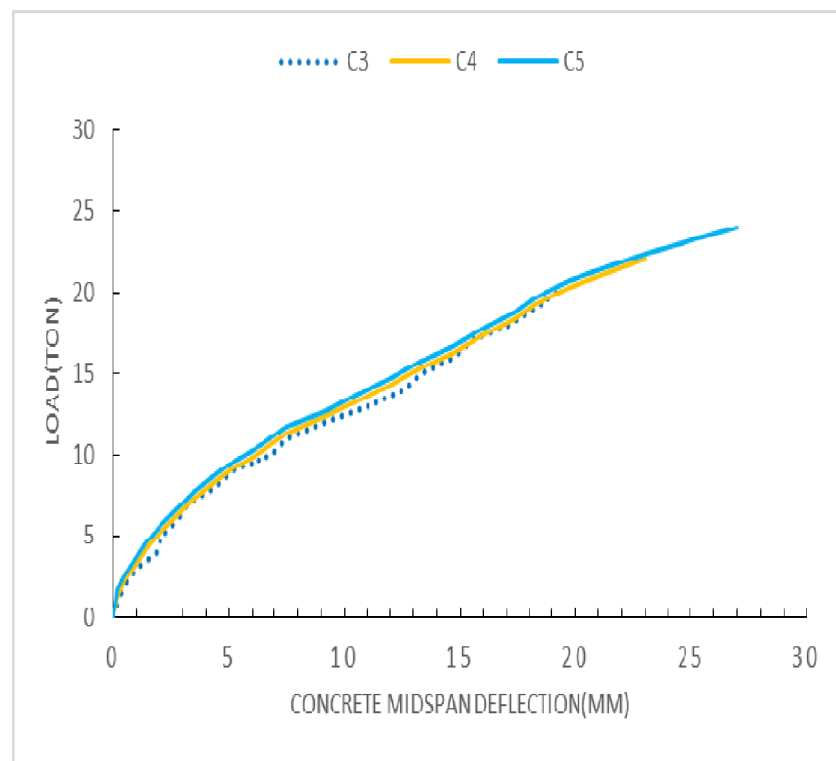


شکل ۱۳- بار-تغییر مکان وسط تیرهای با A₃ (اپوکسی معمولی) و A₄ (اپوکسی قوی) و A₅ (اپوکسی قوی به همراه ماده ضد لغزش)

مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتن سبک T- شکل با ...



شکل ۱۴- بار- تغییر مکان وسط تیرهای B₄ (اپوکسی معمولی) و B₅ (اپوکسی قوی) و B₆ (اپوکسی قوی به همراه ماده ضد لغزش)



شکل ۱۵- بار- تغییر مکان وسط تیرهای C₃ (اپوکسی معمولی) و C₄ (اپوکسی قوی) و C₅ (اپوکسی قوی به همراه ماده ضد لغزش)

	تحلیلی	آزمایشگاهی	تحلیلی	آزمایشگاهی
A_1	۷	۶/۱	۵/۵	۶/۱
A_2	۱۳	۱۱	۹/۵	۱۱
A_3	۱۸	۱۷/۳	۱۳/۱	۱۷/۳
B_1	۶/۹	۶	۵/۳۱	۶
B_2	۱۲	۱۰/۲۲	۱۰/۱	۱۰/۲۲
B_3	۱۳/۳	۱۲	۱۲/۳۴	۱۲
B_4	۱۹	۱۸/۴	۱۹/۹۲	۱۸/۴
C_1	۶/۷	۵	۴/۲	۵
C_2	۱۴/۱	۱۳	۱۷	۱۳
C_3	۲۱	۲۰	۲۳	۲۰

۵- نتیجه گیری

بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته و محاسبات انجام شده در این

مقاله، نتایج زیر به دست آمده است:

۱- در تیرهایی که عمل تقویت خمشی روی آن‌ها انجام گرفت به دلیل کم بودن مقاومت برشی رزین اپوکسی نسبت به بارکششی ناشی از خمش، شکست زودرس جداشدگی ورق GFRP همراه با لایه‌ای از بتن که نامطلوب‌ترین نوع شکست تیرهای تقویت شده می‌باشد اتفاق افتاد و از تمام ظرفیت GFRP استفاده نکردید.

۲- با تقویت خمشی تیرهای T- شکل، کرنش فشاری در مقایسه با تیرهای معمولی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

۳- با تقویت خمشی تیرها میزان بار ترک خوردگی در تیرها افزایش می‌یابد ولی شکل پذیری تیرها کاهش می‌یابد.

۴- تغییر شکل تیرهای تقویت شده خمشی از تیر تقویت نشده کمتر است و حرکت تار خنثی به سمت بالا با سرعت کمتری صورت می‌گرفته است.

۵- در مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی تفاوتی مشهود می‌باشد که ناشی از استفاده از بتن سبک در کار آزمایشگاه، در نظر گرفتن تنش نهایی برای فولاد و FRP در محاسبات، خطاهای آزمایشگاهی، معادلات ریاضی ساده کننده و محافظه کارانه و اثرات غیرخطی در رفتار بتن و فولاد در آزمایشگاه می‌باشد. بار آزمایشگاهی علیرغم اینکه از ظرفیت نهایی تیر و ورق با توجه به گسیختگی برشی در گروه‌ها استفاده نکردید باز هم بیشتر از نتایج تحلیلی می‌باشد.

افزایش کرنش فشاری و کاهش کرنش کششی در یک بار مشخص می‌باشیم که علت آن به جابجایی تار خنثی در اثر تقویت می‌تواند مربوط باشد. در هر حال کرنش کششی با تقویت ورق‌ها به طور قابل توجه افزایش می‌یابد. رابطه تنش کرنش فشاری (۲) ارائه شده توسط هوگنستاید [۱۳] جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. این رابطه با در نظر گرفتن درصد ناچیزی خطای محاسباتی صحت آن برای مولف تایید گردید.

$$\sigma_c = \begin{cases} 0/92f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ 0/92f'_c \left[1 - \frac{0.15}{0/004 - \varepsilon_0} (\varepsilon_c - \varepsilon_0) \right] & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0/003 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن σ_c و ε_c و f'_c به ترتیب تنش فشاری، کرنش فشاری و مقاومت بتن می‌باشد و ε_0 نیز کرنش متناظر با تنش ماکزیمم می‌باشد و برابر با $\frac{1/84f'_c}{E_c}$ می‌باشد که در آن E_c مدول الاستیسیته فشاری بتن مطابق آیین نامه ACI-318-05 می‌باشد [۱۴]

$$E_c = 57000 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

برای روابط تنش و کرنش فولاد و FRP از روابط (۴) استفاده شده است.

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ E_s \varepsilon_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_p = E_p \varepsilon_p$$

که در آن σ_s و E_s و ε_s و ε_y و به ترتیب تنش و ضریب ارتجاعی و کرنش و کرنش تسلیم میلگردهای کششی و E_p کرنش و مدول الاستیسیته GFRP می‌باشد. بار ناشی از کرنش‌های فشاری و کششی در نقطه انتهایی نمودارهای آزمایشگاهی با روابط تجربی ارائه شده مقایسه گردید و انطباق خوبی مشاهده گردید که در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول ۷: مقایسه کرنش فشاری و کششی آزمایشگاهی و تحلیلی

گروه	بار کرنش فشاری	بار کرنش کششی انتهایی (تن)
		انتهایی (تن)

- [6]. Chajes, M J, Thomson T A and Farschman C A (1995 b), purability of concrete beams externally reinforced with composite fabrics, *Construct Baied Mater* 9 (3) 141-148
- [7]. Taljsten B (1997), "Strengthening of concrete structures for shear with bonded CFRP-fabrics" Proceeding of the US-canada-Europe Workshop on Recent Advances in Bridge Engineering-Advanced Rehabilitation, Durable Materials Non-destructive Evaluation and Management, eds U Meier and Betti, EMPA, Dubendorf, July 1997.
- [8]. Hutchinson R. Abdelrahman A and Rizkalla S (1997), shear streng the using CFRP sheets for a prestressed concrete high way bridge in Manitoba, Canada. Proceedings of the us-canada Europe Work shop in Bridge Engineering Advanced Rehabilitation, Durable Materials, Non-destructive Evaluation and mangement. eds meier and R Betti. EMPA, duberdorf july 1997, pp 97-104.
- [9]. Saadatmanesh H. and Ehsani M.R. « RC Beams Strengthened with GFRP Plates" Experimental Study, *Struct Eng* 117(11), pp. 3417-3433.
- [10]. Hotchinson A.R. and Rahimi H. « Behavior of Reinforced Concrete Beam with Externally Bonded Fiber Reinforced Plastics", Proc 5th International Conference on Structural Faults and Repair, University of Edinburg, 1993, Vol. 3, pp. 221-228.
- [11]. Quantrill, R. J. Hollaway L. C. Thomern A. M. Experimental and analytical investigation of FRP strengthened beam response: Part I. *Magazine of Concrete Research* 1996a; 48(177), 331-342.
- [12]. Garden, H. N. et al. under ROBUST research programe. University of surrey. 1996
- [13]. Hognestad E. A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members (Bulletin No. 399). Urbana: University of Illinois Engineering Experimental Station; 1951. p. 129.
- [14]. ACI 318-05. Building code requirements for structural concrete (318M-05) and commentary (318RM-05). Farmington Hills (Michigan, USA): American Concrete Institute (ACI); 2005.

۶- تقویت تیرهایی که ضعف خمشی بیشتر دارند، موثرتر به نظر می‌رسد.

۷- در صورت رسیدن FRP به شرایط گسیختگی نهایی با توجه به نمودارهای تغییر شکل و کرنش حد نهایی کرنش و تغییر شکل زیادی برای تیرها محتمل می‌باشد.

۸- با استفاده از اپوکسی قوی‌تر بار نهایی با توجه به استفاده بیشتر از ظرفیت تیر افزایش می‌یابد که در حالت استفاده همزمان از اپوکسی پرمقاومت و ماده ضد لغزش افزایش بیشتر بار نهایی و شکل‌پذیری در همه گروه‌ها مشهود می‌باشد.

۹- بدیهی است با توجه به رفتار مکانیکی بالای بتن سبک مورد استفاده در این تحقیق و استفاده کمتر از درشت‌دانه روش‌های تقویتی مورد استفاده در این مقاله با قابلیت بهتر برای بتن معمولی قابل استفاده خواهد بود. علت این امر اصطکاک ایجاد شده بیشتر بین بتن و FRP با توجه به استفاده بیشتر از درشت‌دانه و قابلیت بهتر تقویت در استفاده همزمان از اپوکسی قوی و ماده ضد لغزش در بتن معمولی می‌باشد.

۶- مراجع

- [1]. ACI Committee 440F. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. 2002.
- [2]. Hayder A. Rasheeda,*, ShariqPervaiz "Closed form equations for FRP flexural strengthening design of RC beams" Department of Civil Engineering, Kansas State University, Manhattan, KS 66506, USA
- [3]. Al-Sulaimani GJ, Sharif A, Basun bul A, Baluch M H and Ghaleb BN (1994), Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding, *ACI Structj* 91(4), 458-464.
- [4]. Chajes MJ, Thomson T A, Finch W W and Januszka TF (1994), Flexural Strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials, *Construct Build Mater* 8(3) 191-210
- [5]. Chajes, M J, Thomson T A and Tarantino B (1995 a), Reinforcement of concrete structures using externally bonded composite materials, in *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for concrete structures*, ed. L Taerwe, E & FN Spon, London, pp 501-508.

Bending Strengthening of Light Concrete T-Shape Beams Using FRP Sheets

M.K. Sharbatdar

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University

A. Qods*

PhD. Student, Department of Civil Engineering, Semnan University

(Received: 2014/2/9 - Accepted: 2014/5/6)

Abstract

In order to investigate the effect of Composite Fiber Reinforced Polymers (GFRP) on bending strengthening of light weight T-shaped concrete beams in this paper, nine specimens were designed, built and tested. These specimens were divided into A, B & C Groups, according to their conditions and bars arrangement and composite layers. In Group A, beams were designed to have a medium bending defects, while Groups B and C designed for maximum and minimum bending defects. In each group one beam was as reference and the others were strengthened with different numbers of FRP layers.

According to observations and results, flexural strength increase of in Group A was from 81% to 116% while that was from 33% to 208% in Group B and 67% to 100% in Group C. And also the effect of using stronger epoxy and anti-slipt material to change shear failure (debonding) to flexural debonding and increasing strength was investigated in this paper.

Keywords: T-form beam, Flexural strengthening, light structural concrete.

* Corresponding author: amir.qodes@students.semnan.ac.ir